

不連続な節理性基盤の応力伝播と  
強度評価の基礎的研究(総合題目)

林 正 夫

岩盤の表層近くには節理系が発達していることが多く、その表面からの載荷による応力の伝わり方や、不連続な節理系をふくんだマッスとしての強度を支配する二、三の要因について実験と若干の理論的な考察を試みている。

現実の複雑をきわめる岩盤の力学的な挙動を論じるためにはほど遠い基本的なケースだけしか扱っていない。

応力の伝わり方の考察のために、一つの力学模型を考え、この力学模型ではひびわれ面間の平均的な距離  $C$  の表面での載荷幅  $T$  に対する比率  $C/T$  を、ひびわれ規模と構造物規模の関連をつけるためのパラメーターとして新しく導入し、さらに、応力のつたわり方を考えるためにもひびわれ面のせん断固有抵抗  $\tau_r$  の表面載荷圧  $q$  に対する比  $\tau_r/q$  や、ひびわれ面の摩擦係数  $\tan \phi_r$  などの無次元パラメーターを考慮に入れることにした。そして、ひびわれ面上での応力状態とひびわれ面の局所的なすべり条件を逐次的に結合しながら数値解法を試みた。

その結果としては

(1) 載荷面近くのある深さ  $D$  までは局所的なすべりをひびわれ面上で生じながら、鉛直応力は複合パスカル分布にしたがって下方に伝わってゆき、連続体としての弾性計算にくらべると載荷幅の直下にかたよる傾向がある。

(2) 深さ  $D$  より深いところでは、たとえひびわれが発達しているも、もはや、ひびわれ面での局所的なすべり条件に触れず、したがって連続体の従来の力学が適用できよう。ただしその領域に対しての荷重は、 $D$  を仮想的な表面として  $D$  面まで複合パスカル的に分布してきた応力をこの面の荷重とする。このような深さ  $D$  を転移面と仮称し、その値は上にのべた諸無次元パラメーターの関数として示されている。

(3) このような傾向は、モザイク状基盤を模擬して行なった光弾性実験で確かめた。かならずしもよい合致は得られていないが特性の理解に役立った。不連続基盤の内の光弾性応力解析には、特に、そのために解析方法を整理した円孔応力集中法を試用した。ここでとり扱った力学模型でとり入れた諸パラメーターのほか、さらに考慮すべきはまず主節理面の方向であり今後の研究にまたなければならぬ。〔電研報告土木 63007〕

不連続な節理面をふくむ物体の強度評価にあたってはその材料がかなり脆性的な場合には、脆性材料の実質部の抵抗と節理部分の抵抗の和の形で初等力学的には、巨視的な強度を推定することになるが、

(4) 実際には、考えている一平面内のこれらの合成効果は、その面内での節理面の断続の度数や、それに隣接している同種の面の近づきの程度、およびこれら同種の面の平行している数などのいろいろな要因によって影響を受けることを室内実験によって明らかにした。

(5) これらの要因は上述の単純な合成抵抗値を割り引きしなればならない傾向に影響を与える。

(6) 脆性材料として石膏、珪藻土、水の混合物を用い、不連続節理面としてマイクロワックスを塗布した紙を用いて行な

った約 300 個の比較実験で上述の傾向を確かめ、さらに各節理面ごとに主せん断ひずみのピークが現われ、それらが互いに干渉する場合に上述の強度の低下が生じる様子を皮膜式光弾性実験によって確かめたので

(7) 上述の不連続度数および平行列数のパラメーターに対して、極値分布理論を導入してみたところ、単独節理面の場合からの強度の低下率についてかなり合致した値を実験と理論の間で得たので、今後においてさらに研究をすすめるべきものと思われる。

(8) 以上の応力伝播や強度評価の考察にいたるまでに、筆者の過去の研究として、脆性基盤の破壊に関する模型実験の相似律の適合度の考察、基盤の変形度が上部構造としてのアーチダムの応力状態に与える影響の三次元的な検討、弾性論的なすべり線群と破壊線の関連、斜め軟層をふくむ基盤の応力分布特性などがある。

いずれにしても、実際の岩盤はかなり複雑であり、種々の理想化された場合の基本的研究の積重ねとともに、現地計測技術の発展がとくにのぞまれる。

〔筆者：正員 工博 電力中央研究所〕

アーチ・ダムの基盤内の浸透流  
に関する実験的研究

大 長 昭 雄

1. 緒 言

近年、要求されるダムの高さが大きくなる反面、恵まれた地形ならびに地質条件をそなえたダムサイトは次第に減少し、その結果アーチダムの基盤の重要性も漸次その比重を増してきた。

ダムの基盤の安全性は、所与の基盤構造に対して、ダムから受ける力と浸透流の間げき水圧を考慮した力学的な考察から検討されるべきであり、また同時に基盤を透過する水の流速が割れ目に介在する粘土などの微粒物を流動しない流速でなければならぬ。

しかしながら、今日までのこの問題に対する研究の対象は、主として基盤構造の力学的な性状に関するものであり、浸透流の影響は等閑視されている。この原因は、基盤内の浸透流に関する研究が皆無であるために、浸透流の作用を定量的に基盤の安全性に結びつけることが困難なことによるものと考えられ、また grout curtain や drainage system に関する設計、施工が、主として経験による判断に頼っていて、はなはだ工学的根拠に欠ける原因もここにあると考えられる。

そこで、筆者は基盤内の浸透流を定量的に検討するための手段として、便宜上、均質な媒質内の問題として取り扱っても大過ないという立場をとり、電気的相似法 (electrical analogy) にもとづく実験的な方法による研究を行なった。

この研究は、黒部川第四ダムの基盤の安全性に関する検討の一環として実施されたものであり、その内容は grout curtain に関するものと、drainage system に関するものとに大別される。前者については、この研究を開始したがちょうど一部湛水を完了した時期であったため、その時までには施工した実績にもとづいて実験的な検討を行なったもので、その結果 grout curtain の機能が明らかにされ、additional grouting に際して掘所となる指針を得た。後者については、全く白紙の状態で手がけて設計に関する新しい考え方を提案したものである。

## 2. 電氣的相似法の応用

電氣的相似法の応用には、つぎの基本的な仮定が前提となる。

① 基盤内の浸透流は、Darcy の法則にしたがうものと仮定する。

② 基盤の透水に対する性質は、巨視的に見て与えられた領域内において等方等質なものとして仮定する。

浸透流の問題に対する電氣的相似法の応用は、今日では全く確立されていて、そうとう複雑な問題に対しても適用されるようになってきている。しかしながら、自由水面すなわち浸潤面が存在する三次元模型による実験は、模型自体がさらに複雑になること、三次元的浸潤面の形成がきわめて困難なために、いまだその前例を見ない。

筆者は、二次元模型の電媒質に寒天ゲルを用いて好結果をおさめた京都大学 丹羽教授の例にヒントを得て、さらに高いジェリー強度の寒天ゲルを用いることによって、この問題を解決した。

## 3. 検討結果

浸透流に関する考察は、まず簡単な一次元および二次元問題から手がけて三次元問題に終りを遂げた。そして、その結果の一部を原型と対比することによってその真实性を確認し、さらに理想化された岩盤に関する考察を導入して、grout curtain の実体、Darcy の法則の適用性、岩盤の割れ目の中の流速などについて言及してみた。

これらの要点のみを列挙すると、

① 黒部川第四ダムの基盤内の浸透流を、便宜上、均質な媒質内の問題として取り扱っても大過ないこと、流量の絶対値を取り上げた場合にも、かなりの信頼度を持つ結果が得られることが実証された。

② grout curtain および drainage system に関する機能と、後者の適切な配置に関する具体的な解答を得た。

それを要約すると grout curtain の機能は、過度の流速を持つ流れが発生するような基盤の割れ目をふさぐことによって、浸食作用による基盤の支持力の劣化を抑制することにあると考えべきであり、浸潤面を低下する場合の有効な工法とならないことがわかった。他方 drainage system は、浸潤面を低下する場合の非常に有効な手段であり、基盤の滑り破壊に対する抵抗に関して重要な部分の直下に配列するのが最も得策となることを知り得た。したがって、浸透流に対する基盤の保全策として、いずれか一方のみの機能では不十分であり、両者の分に応じた使い分けが必要なことはいうまでもない。

③ 基盤の破壊に対する安全性を検討する場合に必要な間げき水圧の分布に関する有益な資料を提供し得た。

上述の検討結果は、主として経験による判断に頼ってきた問題を工学的に取り扱う可能性があるという一つの実例を提示したものであるが、今後開発されるダム地点の基盤の割れ目の分布状態のいかんによっては、十分利用し得るものと考えられる。

本研究は、東京大学 嶋 祐之教授のご指導を受け、元黒四建設事務所 野瀬所長、芳賀所長代理をはじめとする上長各位のご理解と、森 章夫氏 (KK 間組) および塩崎信雄君、松岡元一君 (関西電力KK) の協力のもとに完成したものであり、ここに厚く謝意を表する次第である。

[筆者：正員 関西電力KK 建設部]

## 軸圧縮力を受ける円弧アーチの 曲げねじれ座屈に関する研究

深 沢 泰 晴

近年、構造要素としての薄肉材の力学的有利性が評価され、H. Wagner によって端緒が開かれたその理論的、実験的研究は、過去 30 有余年間はなばなく展開され、構造設計に大きな革新をもたらすにいった。特に、その弾性安定問題の解析においては、オイラーの古典的座屈理論から脱皮し、三次元的な新しい座屈現象が注目されるようになり、現在ではすでにその特性は実用上十分なまでに究明され、体型づけられるにいたっている。しかるに、これらの研究のほとんどが直線材を対象とするものであり、この種の理論の曲線材への拡張を試みた研究は非常に少なく、曲線材の座屈特性はまだ不明な点が多い。

本論文は、著者の行なっている曲線形薄肉けた構造に関する一連の研究の一部であり、曲線材の不安定現象のうち最も基本的な問題を取り扱ったものである。すなわち、軸圧縮力だけを受け一軸対称な薄肉断面をもつ曲率一定な曲線材 (円弧アーチ) の曲率面外への曲げとねじれとの連成したいわゆる曲げねじれ座屈について論じたものである。

曲線材の軸圧縮状態は、その線形と外力のつくる圧力線とが一致するような載荷状態において出現し、円弧アーチでは曲率中心に向う等分布荷重、放物線アーチでは鉛直等分布荷重がこれに対応する載荷状態である。したがって、本論文の理論的解析は前者の場合に限られているが、その結果は近似的には後者の場合にも適用することができる。このような曲線材の座屈は現象的には中心軸圧縮力を受ける直線柱の曲げねじれ座屈に通ずるものであるが、その特性は曲率の影響のため自ら異なってくる。

問題の解析にあたっては、まずこのような座屈現象を支配する弾性方程式を、座屈変形にともなう外力の作用方向の変化に応じて類別される三種の場合について誘導した。これはアーチ面外への変位とねじれ回転角に関する線形連立常微分方程式であり、したがって座屈荷重の算出は超越関数の連立方程式を解くことに帰せられる。この数値計算は境界条件によっては非常に複雑であり、その労に耐えられない場合が多い。そこでいくつかの無次元パラメータを導入し、これらを適当な範囲内で変化させて、電子計算機によって一連の数値計算を行ない、その結果をいくつかの図表にまとめて、一般的な使用の便に供しようようにするとともに、種々の傾向が容易に把握できるようにした。

以上得られた結果を総合的に解析し、つぎのような事柄について、円弧アーチの曲げねじれ座屈特性を明らかにした、

- 1) アーチ リブの各種の剛性が座屈荷重におよぼす影響、
- 2) アーチの線形、特に曲率 (あるいはライズ スパン比) が座屈荷重におよぼす影響、
- 3) 載荷条件が座屈荷重におよぼす影響、
- 4) 支点条件と座屈荷重との関係、
- 5) 座屈形の特徴、
- 6) アーチ面内の座屈と曲げねじれ座屈との関係。

特に、6) のアーチ面内の座屈と曲げねじれ座屈との関係はつぎのような意味を有する。すなわち、非常にへん平なアーチにおいて起こる可能性のある飛移現象ならびに屈服現象をのぞけば、弾性安定論から抑えられるアーチの耐荷力は、この両座屈荷重

のどちらかによってきまってくる。各種の曲率ならびに断面形のアーチについて、この両座屈荷重を比較検討した結果、横曲げおよび断面のそりが自由な支点条件の場合には、よほど幅の広い断面でない限り、ほとんど曲げねじれ座屈が先行し、また完全固定のアーチにおいても、単一アーチでは、なかならず開断面の場合には、曲げねじれ座屈が意外に支配的であることが判明した。なお、これら両座屈荷重が相等しい条件は「アーチの断面の弾性安定論的対称条件」と呼ぶことができ、これは弾性安定論の立場からみたアーチの最も合理的な断面形を示唆するものであるといえる。

アーチ リブのねじれ剛性あるいは曲げねじれ剛性のいずれかが無限大という極限の場合は、実質的なねじれ変形をとまわらない「アーチの横曲げ座屈」に相当する。この場合の座屈係数は、アーチ リブの各曲率に対し、曲げねじれ座屈係数の上限値を与えるものであるから、アーチの横方向の安定性を論ずる際には、この横曲げ座屈も大きな役割を果たす。その意味でこれについても特に検討を加えた。

本論文の主題であるアーチの曲げねじれ座屈の現象を実証しまた理論的取り扱いの妥当性を確認するために、以上述べたよ

うな理論計算と平行して、モデルアーチによる実験的研究も行なった。12本のモデルアーチについて、砂を用いた簡便な載荷装置によって行なった実験の結果は、一部をのぞいてほぼ満足すべきものであり、特に完全固定のアーチで、ねじれに関係する剛性が小さい場合には、端部と頂部との断面が反対方向にねじれるという計算前には予想できなかった現象をも、実験のモデルアーチはあざやかに示した。

曲線材の面外への安定問題は、橋梁構造として出現する長大支間のアーチ橋の設計においても、重要な意義を有する。支間の増大とともに、橋は横方向にも極度に細長い構造物となり、アーチ面内の安定問題よりはむしろ、側方への安定問題が支配的となり、主構形式によっては橋梁幅員との関連において、支間に自ら限界が存在することも考えられる。このような問題の取り扱いは、例えばスパンドレルアーチ橋の場合には、アーチ橋全体すなわち閉じた立体トラス構造を静力学的に等価な一本の閉断面桁におきかえて、本論文で扱ったような単一アーチの理論を適用することができる。

[筆者：学生員 東京大学大学院]

## CIVIL ENGINEERING IN JAPAN 頒布

CIVIL ENGINEERING IN JAPAN, 1961	A 4判 80 頁	定価 700 円 (〒共)
CIVIL ENGINEERING IN JAPAN, 1962~1963	A 4判 125 頁	定価 700 円 (〒共)

# 高張力鋼デザインマニュアル 新刊書

八幡製鐵株式会社  
高張力鋼デザインマニュアル  
各編集委員会編

各編共箱入特製  
A 5判・ビニール表紙  
送料各 150 円

## 橋 梁 編

橋梁編編集委員会編  
東京大学教授・工博

主査 平井 敦  
定価 1700 円(共通編共)

## ペンストック編

ペンストック編編集委員会編  
東京大学教授・工博

主査 奥村敏恵  
定価 1800 円(共通編共)

## 建 築 編

主査 仲威雄  
定価 1600 円(共通編共)

## 造 船 編

主査 吉識雅夫  
定価 1800 円(共通編共)

最近橋梁においても従来使用されていたSS 41に対し、50キロ級高張力鋼(SM 50 など)の使用が一般化しつつある。さらにより強度のものも使用されるようになったが、今まで適当な資料がなかった。本編は高張力鋼を橋梁用材として有効に使用するための指針となるものである。

高張力鋼を使用するペンストックの設計について従来適切な書がなかったが、本編ではこの分野の第一人者が十分討議を重ね、現段階で最高水準と考えられる方式を十分に盛り、その構造、使用条件等特有性を誰にも理解できるよう懇切に記述した。

## 圧 力 容 器 編

主査 中村 素  
定価 1800 円(共通編共)

東京・神田旅籠町  
電話(251)0808~9  
振替東京 36087 番

理 工 図 書 KK

—御申越次第内容見本送呈—